



综述

认知无线携能通信的关键技术及其研究进展

许晓荣, 孙明杭, 沈霖晖, 姚英彪, 冯维

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 认知无线电 (CR) 与无线携能通信 (SWIPT) 的结合已经成为当今高效能认知无线通信的研究热点之一。首先阐述了 SWIPT 与认知 SWIPT 网络, 而后介绍了 SWIPT 网络中两种接收机结构并给出相应的能量收集公式。然后, 给出了认知 SWIPT 系统模型及其与协作中继技术、MIMO 技术相结合进行系统建模的研究进展, 并对认知 SWIPT 网络关键技术的未来研究方向进行了展望。最后, 总结了近年来对认知 SWIPT 网络关键技术的研究成果, 为高效能的安全认知 SWIPT 通信理论与未来应用提供了一定的借鉴意义。

关键词: 无线携能通信; 认知 SWIPT 网络; 系统建模; 研究成果

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020138

Key technologies and research progresses in cognitive SWIPT

XU Xiaorong, SUN Minghang, SHEN Linhui, YAO Yingbiao, FENG Wei

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The combination of cognitive radio (CR) and simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) has become one of the research hotspots in modern high-efficient cognitive radio communications. Firstly, the introduction of SWIPT and cognitive SWIPT were illustrated. Secondly, two types of receiver structures commonly used in SWIPT networks were introduced and the corresponding energy harvesting formulas were given. Thirdly, system model of cognitive SWIPT network and the research progresses of cognitive SWIPT combined with cooperative relaying and MIMO were presented respectively. Future research prospects of the key technologies in cognitive SWIPT network were investigated. Finally, some recent research achievements of the key technologies in cognitive SWIPT were given. Certain referencing values in the theoretical research and future practical applications of high energy-efficient secure cognitive SWIPT communication network were provided.

Key words: simultaneous wireless information and power transfer, cognitive SWIPT network, system modeling, research achievement

收稿日期: 2019-11-26; 修回日期: 2020-04-23

通信作者: 许晓荣, xuxr@hdu.edu.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金一般项目 (No.LY19F010011); 国家自然科学基金项目 “认知无线携能通信中的安全协同传输与资源管理技术研究”; 国家留学基金委与浙江省教育厅联合资助出国研修项目 (No.201908330543); 2017 年度杭州电子科技大学 “优秀骨干教师支持计划” 人才项目

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Zhejiang Provincial of China (No.LY19F010011), The National Natural Science Foundation of China “Research on Secure Cooperative Transmission and Resource Management Technologies in Cognitive SWIPT Communications”, Cooperation Program of China Scholarship Council (CSC) and Department of Education of Zhejiang Province of China (No.201908330543), Excellent Backbone Teacher Support Program in Hangzhou Dianzi University in 2017



1 引言

随着无线通信技术的发展,无线业务数据量呈爆炸式增长,而各种无线设备都需要一定的频谱资源传输数据,这给稀缺的频谱资源带来了巨大的挑战。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的报告指出,目前频谱资源稀缺并非因为频谱物理意义上的缺少,而是频谱利用率低和严格的频谱分配政策所致^[1]。目前可供使用的频谱资源稀缺,而且授权的频谱资源利用率低下,因此,如何提高频谱效率已经成为当前无线通信亟需解决的问题之一。目前,作为5G关键技术之一的认知无线电(cognitive radio, CR)技术被认为是提高频谱效率的有效手段之一^[1]。

人们已经成功地利用电磁波进行信息传输,无线电波能量是一种潜在的绿色能源,但是利用电磁波传输能量一直没有得到很大的发展,其中能量收集效率低下是一个亟待解决的关键问题。近年来,研究人员注意到,无线射频(radio frequency, RF)信号不仅能携带信息,同时作为电磁波还能携带能量,随着RF信号能量收集电路的发展,RF信号的能量收集效率大大提高,人们看到了信息与能量同时传输的可能性。作为无线信息传输(wireless information transmission, WIT)和无线能量传输(wireless power transmission, WPT)的结合,无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)技术由此诞生^[2-4]。

SWIPT为能量受限网络中的节点提供了无线能量收集的新方法,实现了信息与能量的同时传输。CR为频谱资源稀缺与频谱利用率低下的矛盾提供了新的解决方案。作为两者的结合,认知SWIPT可以充分利用CR机会利用频谱资源与SWIPT信能同传的特点,提高无线网络的频谱效率(spectral efficiency, SE)和能量效率(energy efficiency, EE)。认知SWIPT可以在保证一定频谱效率的同时保障系统能效,它是未来高效认

知无线通信技术的发展方向之一。

2 SWIPT与认知SWIPT

2.1 SWIPT

目前,大多数电子设备都是通过容量有限的电池供电的,但是,在某些特殊场景下的电子设备无法采用电池持续供电,例如内置于人体的电子治疗仪器等。人们已经注意到,电磁波不仅具有传输信息的能力,而且自身带有能量,因此关于无线能量传输的研究不断涌现。早在1891年,电磁理论提出者Tesla就已经有利用电磁波传输能量的想法,其在长岛建设无线能量传输塔,尝试为大西洋彼岸的设备进行能量传输,但是实验以失败告终。之后关于WPT的研究和实验一直都在进行中,但是效果都不尽如人意。直到2006年11月,以麻省理工学院的Soljacic教授为主的团队^[3-4]连续发表了一系列振奋人心的研究成果并在全球技术、娱乐与设计大会(Technology, Entertainment, Design, TED)上利用“电磁共振理论”成功点亮了相隔约2 m的一只60 W的电灯泡后,WPT的技术才有了质的突破。

之后作为WIT和WPT的结合——SWIPT的概念开始诞生。2008年,Varshney^[5]首次提出信息与能量协同传输的概念,并得出在输入振幅受限的单天线或点对点(single input single output, SISO)单天线加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)信道下,最大化信息传输速率和传输能量效率之间存在非遍历的折中。但是,该信道模型与现实生活相比过于简单,以及缺少对发送功率等实际因素的约束,使其研究无法在实际应用中得到体现。2013年,学者Zhang及其研究团队对SWIPT的概念进行了更详细的描述,并建立了一种有新的研究框架和可实现的接收机方案,分别提出了两种不同的具有实际工程可操作性的接收方案,即功率分割(power splitting, PS)模式和时隙切换(time switching, TS)

模式^[6-7]。功率分割模式将接收到的信号按照功率分割因子分成两部分，一部分进行能量收集（energy harvesting，EH）；另一部分进行信息解码（information decoding，ID）。时隙切换模式则是在不同的时间间隔内对信号进行信息解码或者能量收集。两种模式下的 SWIPT 接收机结构如图 1 所示。

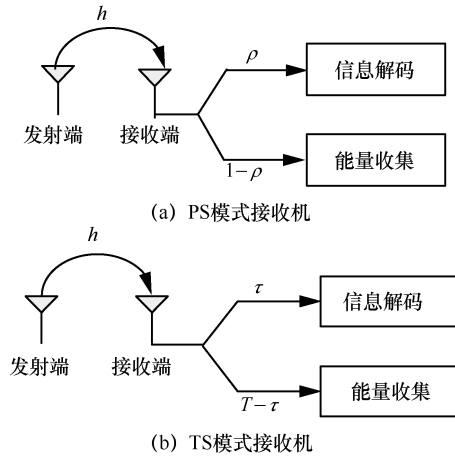


图 1 两种模式下的 SWIPT 接收机结构

能量收集公式可以分别表述为：

$$\begin{cases} Q^{\text{PS}}(\rho, P_t) = \xi(1-\rho)P_th \\ Q^{\text{TS}}(\tau, P_t) = \xi(T-\tau)P_th \end{cases} \quad (1)$$

其中， Q^{PS} 、 Q^{TS} 分别为功率分割模式和时隙切换模式下收集的功率， ρ 、 τ 分别为功率分割因子与时隙切换因子， ξ 为能量转换效率， P_t 为发射端发射功率， h 为信道增益， T 为传输时间。

近年来，业界已经开始将多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）与 SWIPT 进行结合。参考文献[8]将 SWIPT 技术应用于 MIMO 信道，证明了在 MIMO 信道中，SWIPT 有助于同时提高信息传输和能量传输的效率。参考文献[9]研究了 3 节点的简单 MIMO SWIPT 通信系统，推导了信息传输速率和能效折中的最佳传输策略，但仍存在尚未解决的问题，例如如何将该策略推广到多个 SWIPT 用户，同时现实中难以实现文献所提出的理想接收器结构。不同于参考文献[9]，参考文献[10]研究了具有多个能量收集

（EH）中继节点的通信网络，在能量约束下进行 MIMO SWIPT 通信的波束成形设计，同时考虑了不完全信道状态信息（channel state information, CSI），使其更加符合实际场景。参考文献[11]设计了在信道信息状态完美和已知发送节点 CSI 二阶统计量两种情况下的不同编码器结构。类似地，参考文献[12-13]研究了最差 CSI 情况下的多输入单输出（multiple-input single-output, MISO）信道 SWIPT 通信稳健传输方案，其目标是在保障信息速率高于一定阈值的同时最大化 SWIPT 节点收集的能量。参考文献[14-15]在此基础上研究了 MISO 信道中的稳健安全波束成形设计。

参考文献[16]研究了在瑞利衰落信道下 3 节点 MIMO 中继信道 SWIPT 系统采用分离接收机的低复杂度天线切换方法。假设将信道路径最优的 N 根天线用于解码，剩下的用于整流。与此同时，参考文献[17]对大规模 SWIPT 网络中协作中继的密度与所选中继对信息传输/能量收集折中性能的影响进行了分析。参考文献[18]研究了 MISO 异构蜂窝网络中能效优先的 SWIPT 波束成形方法，以最大化信息传输能效（information transmission efficiency, ITE）和能量收集能效（energy harvesting efficiency, EHE）为目标，采用分式规划求解优化问题，设计了迫零（zero-forcing, ZF）波束成形器和混合波束成形（mixed beam-forming, MBF）器获得最优发送功率。参考文献[19]研究了分簇无线传感器网络的 SWIPT 中继协作传输，能量约束中继节点收集 RF 信号能量并用收集到的能量进行数据分组转发。该参考文献构造约束非凸优化问题，采用分式规划分布式迭代算法求解该优化问题，进行功率分配、信息传输/能量收集的功率分割（PS）与中继选择。研究表明，功率分割因子对中继选择的影响较大^[19]。同时，该参考文献研究了 SWIPT 中继数、簇内距离、最大允许发送功率等参数对 SWIPT 能效与平均能量收集功率的影响^[19]。表 1 对上述



表 1 各参考文献 SWIPT 系统模型、接收机结构与优缺点

参考文献	接收机结构	系统模型	优化目标	优缺点
[6]	时隙切换, 功率分割, 集中式, 分布式	点对点, 单天线	速率-能量折中	优点: 提出了通用的接收机操作, 分析了不同架构下的速率-能量域 缺点: 假设过于理想
[7]	时隙切换	点对点, 单天线	速率/能量折中	优点: 考虑了窄带平坦衰落信道的时变信道干扰, 推导了时隙切换的最佳模式切换策略, 同时研究了接收电路能耗对系统的影响 缺点: 模型为单点对点通信, 天线数较少, 模型简单
[8]	时隙切换	多用户, MIMO	遍历容量与平均收集能量之间的折中	优点: 设计了多用户调度方案, 达到了速率-能量折中, 同时设计了保障能效的两种公平调度方案 缺点: 每个时隙只选择一个用户进行信息传输, 其余用户进行能量收集, 系统吞吐量有待进一步的提升
[9]	时隙切换 功率分配	3 节点, MIMO	速率-能量折中	优点: 对不同情况下的 SWIPT 接收机均提出了可达的速率-能量域 缺点: 未推广到多用户场景
[11]	时隙切换	双跳, 多天线	速率-能量折中	优点: 研究了两种 CSI 情况下的预编码器, 分析了对应的速率-能量域, 可应用于多天线发送节点中 缺点: 未考虑到未知 CSI 情况下的预编码器设计
[12]	时隙切换	MISO	最大化能量收集	优点: 多天线广播系统, 将带约束的非凸问题转换为松弛半定规划问题 缺点: 仅为双跳模型, 较为简单
[16]	动态天线切换	MIMO	最优路径和最小化中断概率的分配策略	优点: 推导了中断概率的闭式表达式, 可以推广到多用户干扰场景, 复杂度低 缺点: 为了降低复杂度, 天线分配算法较为简单
[17]	功率分割	放大转发 (amplify-and-forward, AF) 双向中继	最大化能量效率	优点: 提出了联合功率分配比的优化方案, 可以应用到其他场景 缺点: 只给出局部最优解和等功率分配方案的闭式表达式
[18]	分用户	MISO	最大化速率和最大化能量以及之间的关系	优点: 考虑微小区场景, 为了解决非凸性问题, 设计了两个波束成形器 缺点: 仅考虑上行信道未考虑不完美 CSI 对系统的影响, 对于同信道如何部署在多小区有待研究
[19]	功率分割	多个传感器节点簇和一个汇聚节点	最大化能量效率	优点: 应用于协作式集群无线传感器网络中, 利用分数规划和对偶分解, 设计了功率分配和中继选择的分布式迭代算法, 以解决非凸优化问题 缺点: 未考虑协作式集群无线传感器网络的用户间干扰与同频复用问题

参考文献中的 SWIPT 系统模型、接收机结构与优缺点进行了归纳。

2.2 认知 SWIPT

SWIPT 为能量受限网络中的节点提供了能量收集的新方法, 实现了信息与能量的同时传输。CR 为频谱资源稀缺与频谱利用率低下的矛盾提供了新的解决方案^[20]。作为两者的结合, 认知

SWIPT 可以充分利用 CR 机会利用频谱资源与 SWIPT 信能同传的特点, 提高无线网络的频谱效率和能量效率^[20]。

参考文献[21]最早研究了认知 SWIPT 网络的最优模式选择方法。由于传感器节点不能同时进行能量收集与频谱接入, 学者 Park^[21]利用马尔可夫决策过程制定了在一个时隙内是进行能量收集

还是进行频谱接入的最优模式选择, 所提出的决策过程在能量收集和瞬时吞吐量之间得到了平衡。随后, 参考文献[22]提出了在认知无线网络(cognitive wireless network, CRN)中利用主用户的无线射频信号为认知用户供能的通信模型。每个主用户发射机设定一定的保护区和能量收集区, 认知网络中的次级用户发射机(secondary transmitter, ST)(或称为认知用户发射机)根据所处位置以及主用户是否空闲可以有以下 3 种模式。

- 收集模式, 若 ST 处于能量收集区内, 同时未完全充电, 则收集主信号中的能量。
- 发送模式, 当 ST 已经完全充电, 同时主用户空闲且其主用户的保护区外, 则发送数据。
- 空闲模式, 若 ST 在主用户的保护区内或者 ST 没有完全充电同时主用户没有处于空闲状态, 则 ST 处于空闲状态。认知 SWIPT 网络能量收集示意图如图 2 所示。在此基础上, 参考文献[21]分析了 ST 的传输概率和认知网络的空间吞吐量, 并推导了在给定中断概率约束的情况下, 认知网络吞吐量最大化时 ST 的最优传输功率和 ST 密度, 为未来的认知 SWIPT 网络优化提供了一种有效的方法。

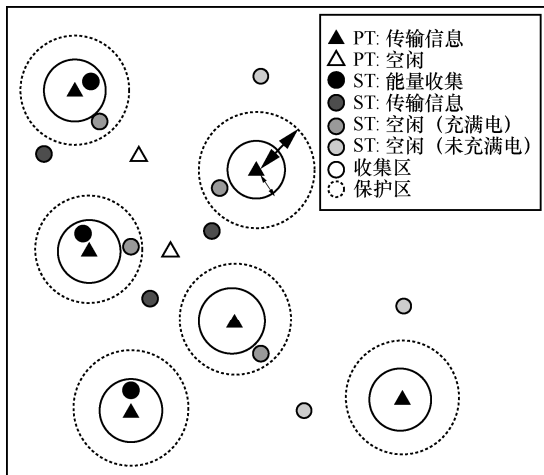


图 2 认知 SWIPT 网络能量收集示意图

参考文献[23]首次研究了认知 SWIPT 网络在

频谱共享场景中, 基于信道质量阈值并利用机会调度方法, 得到认知用户的遍历容量、误码率、吞吐量和能量收集的解析表达式, 并确定了满足给定目标中断概率的最优阈值。参考文献[24]研究了较为基础的具有平均能量约束的认知 SWIPT 系统, 提出了两种分别由功率控制(power control, PC)和传输概率(transmission probability, TP)控制的传输方案, 以最小化认知 SWIPT 网络中断概率为目标, 给出了最佳解决方案, 同时比较了两种传输方案的中断概率, PC 方案的中断概率解析式如式(2)所示:

$$\Pr_{p_1}^{\text{out}} = \Pr \left[\frac{P_p |h_{pp}|^2}{P_{s_m} |h_{sp}|^2 + N_0} < \eta_p \right] \quad (2)$$

TP 方案的中断概率解析式如式(3)所示:

$$\Pr_{p_2}^{\text{out}} = (1 - p_{st}) \Pr \left[P_p |h_{pp}|^2 < \eta_p \right] + p_{st} \Pr \left[\frac{P_p |h_{pp}|^2}{P_s |h_{sp}|^2 + N_0} < \eta_p \right] \quad (3)$$

其中:

$$\eta_p = 2^{R_p} - 1 \quad (4)$$

其中, $\Pr_{p_1}^{\text{out}}$ 为 PC 方案的中断概率, $\Pr_{p_2}^{\text{out}}$ 为 TP 方案的中断概率, P_p 为主用户传输功率, P_{s_m} 为 PC 方案中的 ST 传输功率, h_{pp} 为主网络的信道状态, h_{sp} 为主网络到认知网络的信道状态, N_0 为加性高斯白噪声, p_{st} 为 TP 方案中的 ST 的概率, R_p 为主用户的传输率。

与参考文献[24]相似, 参考文献[25]提出了 3 种信息和能量协同传输方案。首先假设两个系统之间存在信息和能量转移的理想反馈, 然后考虑了时隙分割和功率转换两种接收机模式下的信息和能量传输方案, 对于每一种方案都推导了最优解和 ZF 解。同时, 该参考文献给出了无线携能通信有效提升的网络性能, 当能量传递的效率足够大时, PS 模式在传输速率方面比 TS 模式更具优势。



目前,已有越来越多的研究将认知无线电技术应用于认知 SWIPT,也有不少研究人员将认知 SWIPT 与 5G 技术(如协作中继技术、MIMO 技术等)相结合。表 2 归纳了认知 SWIPT 文献中的系统模型、优化目标与优缺点。

3 认知 SWIPT 系统模型与关键技术

3.1 认知 SWIPT 与协作中继技术

参考文献[26]从理论上分析了 CRN 中的认知发射机吞吐量(可达速率),并利用时间平稳的离散马尔可夫过程进行建模,得到吞吐量(可达速率)上限,但是未对能量收集认知无线网络的最佳频谱访问策略进行研究。参考文献[27]研究了一种无线能量收集协议,分析了中继辅助认知网络在多约束和存在用户间干扰情况下的中断概率,并提出了中断概率的灵敏度分析方法。然而,这些参考文献构造的系统模型在上述工作中的表

现并不好,即中断概率非常高。用于改善中断性能的可行解决方案是通过在源和目的节点之间部署多个中继以利用空间分集。这些想法促使 Le 等^[28]研究了一种改进的认知 SWIPT 模型,其中认知用户可以从主用户收集能量,并以重叠共享的方式接入主用户的授权频谱,以传输认知 SWIPT 网络数据。

参考文献[29]考虑了在时隙协作认知无线网络(collaborative cognitive radio network, CCRN)中,认知用户从 RF 无线电信号中收集能量并转发主用户信号,以换取其自身传输的一小部分时间。参考文献[30]分析了基于 SWIPT 的 CCRN 中断性能,其中认知 SWIPT 中继节点从主用户收集能量。参考文献[31]考虑了一个专用(或第三方)中继节点,它具有用于中继传输的能量收集功能,同时研究了系统中断性能。在参考文献[29-31]的基础上,参考文献[32]研究了具有动态能量收集的 CCRN SWIPT 机会中继,提出了基于动态协同的

表 2 认知 SWIPT 参考文献中的系统模型、优化目标与优缺点

参考文献	系统模型	优化目标	优缺点
[20]	单向中继,双向中继,多节点	最大化吞吐量,最大化和速率	优点:详细分析了单向和双向中继认知 SWIPT 网络,同时给出复杂度低的 最大化吞吐量次优解 缺点:未考虑收发节点距离和干扰因素
[21]	多认知节点	最大化总吞吐量	优点:利用马尔可夫决策模式选择,有效实现能量收集与瞬时信息吞吐量(速率)的均衡 缺点:主用户和认知节点数较少情况
[22]	多主节点,多认知节点	最大化次网络吞吐量	优点:基于经典认知无线网络模型,提出了一种新的主次网络共存方法; 缺点:需要考虑各节点之间的距离以及主次网络范围和当前节点状态,复杂度较高
[23]	单主节点,单认知发送节点,多认知接收节点	给定中断概率下的最佳阈值	优点:给出了遍历容量、误符号率、吞吐量和收集能量的解析表达式,并给出满足目标中断概率的最佳阈值 缺点:主要考虑认知网络,对于主网络的分析较少
[24]	单主收发节点,单收发认知节点	最小化次用户的中断概率	优点:提出了由功率和传输概率控制的新型传输方案 缺点:节点数目较少,推广到实际情况存在一定的难度
[25]	单主收发节点,单收发认知节点	最大化认知用户的信息速率	优点:研究了两个系统之间的联合信息与能量协作 缺点:只考虑一对主用户和一对认知用户情况,同时已知 CSI

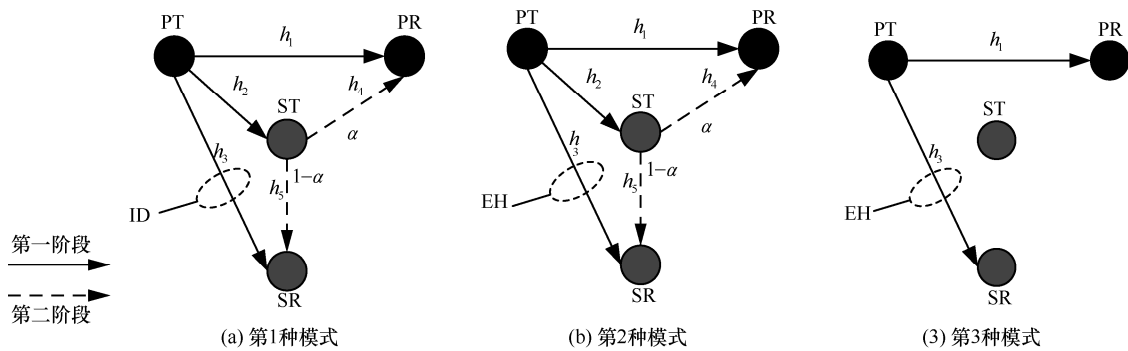


图3 基于动态协同的认知 SWIPT 系统模型新框架

认知 SWIPT 系统模型新框架,该框架如图 3 所示,采用直接传输、中继传输和能量收集 3 种模式。在第一种模式中,ST 作为中继,SR 在第 1 种模式解码从主用户发射机(primary transmitter, PT)接收的信号,如图 3 (a) 所示;在第 2 种模式中,ST 用作中继,并且 SR 在第一阶段中从 PT 接收信号能量,如图 3 (b) 所示;如图 3 (c) 所示,在第 3 种模式中,ST 保持沉默,并且 SR 从 PT 收集能量。

总而言之,基于动态协同的认知 SWIPT 系统模型新框架的独特特征有 3 个方面:首先,有 3 种传输模式:第 1 种模式可以用于直接传输,第 2 种模式与第 3 种模式用于中继传输;其次,由于能量收集功能嵌在 SR 中,能量收集可以应用于直接传输与中继传输;第三,根据信道条件,中继和能量收集都是动态的。

在认知 SWIPT 协作中继中,主用户向认知用户提供无线能量和频谱。作为回报,认知 SWIPT 协作中继可以传输主用户的信息,其示意图如图 4 所示。主用户可以从该协作方式中提高吞吐量和提升覆盖范围,同时能量受限的认知用户可以提升能量效率或者传输所需功率^[33-34]。

参考文献[34]研究了双向认知 SWIPT 协作中继网络,在研究系统中断性能的同时,分析了 SWIPT 中的功率分割因子和中继位置对性能的影响。Al-Habob 等^[35]研究了由多个主用户接收机组成的认知 SWIPT 协作中继网络。考虑单源节点经

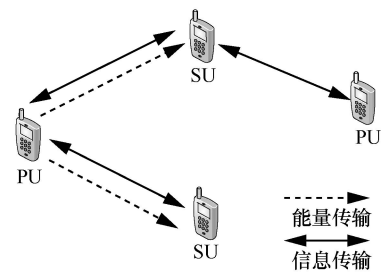


图4 认知 SWIPT 协作中继示意图

由解码转发(decode-and-forward, DF)中继进行通信,其中中继采用 PS 模式从同一个信号中进行能量收集与信息解码。参考文献[36]研究了在平坦瑞利衰落信道下的认知 SWIPT 机会中继选择方案及其性能。参考文献[37]提出了一种多目标双跳 underlay 认知 SWIPT 协作中继协议。参考文献[38]研究了认知无线网络中的携能通信,通过联合优化功率分割因子和中继的能量分配来最大化认知 AF 中继网络的吞吐量。

上述研究中的中继为单向中继,即只辅助传输源节点的信息,之后学者考虑了双向认知 SWIPT 中继网络,其中中继利用接收到的能量进行辅助传输认知用户的信息。在对主用户干扰约束下联合优化了中继选择与功率分配,并给出了一种次优解,通过数值仿真得到了中继最佳位置。参考文献[39]提出了由多个认知 SWIPT 中继组成的通信网络中的近似最优中继选择与功率分配方案^[39]。

除了单向与双向中继,参考文献[40]提出了认知 SWIPT 系统中的半双工与全双工中继。对于认



知半双工正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 中继系统, 接收机采用 PS 模式 underlay 接入策略。在服务质量 (quality of service, QoS) 和主用户干扰约束下联合优化功率分割因子, 进行子载波分配与功率分配, 以最大化网络容量。对于认知全双工中继, 参考文献[40]设计了一种新的收发机架构, 即在放大转发源节点信息的同时不断接收源节点的信息进行能量收集, 该架构能够收集中继产生的自干扰中的能量, 从而无须像传统的全双工中继进行自干扰消除。

参考文献[41]研究了 CRN 中安全无线信息与功率传输的问题。其中 ST 帮助主发射机到主接收机的信号传输, 同时它也将自己的信号发送到 SR。主接收机 (primary receiver, PR) 和 SR 都基于功率分配策略解码信息并从接收信号中获取能量。由于 CRN 的开放式架构, SR 的信息很容易被 PR 窃听。其策略的优化目标旨在最大限度地降低 ST 的发射功率, 同时保证最低信息速率和 PR 与 SR 的收集能量, 并限制 PR 的潜在窃听率。考虑到 ST 已知不完美 CSI, 提出了 ST 处的联合稳健波束成形方案和 PR 与 SR 的功率分配, 其可以在最坏情况下最小化发射功率。

3.2 认知 SWIPT 与 MIMO 技术

目前, 将认知 SWIPT 与 MIMO 相结合设计多天线认知 SWIPT 系统中的波束成形向量与资源调度策略已经成为认知 SWIPT 网络的研究方向之一。参考文献[42]研究了认知 SWIPT 多用户单信道网络的性能。为了控制对主用户的干扰并为认知用户实现适当的 QoS, 多天线 ST 可以通过优化波束成形向量和传输功率来引导信号远离主用户^[43-45]。然而, 上述关于 CRN SWIPT 的参考文献仅考虑了单发射机和单信息接收机的问题, 即在优化问题中仅有一个波束成形向量用于数据传输。参考文献[46]研究了多用户 MISO 重叠频谱共享认知 SWIPT 网络中下行波束成形与发射功率最优化问题, 它被认为是多用户认知 SWIPT 网络资源调度优化问题的扩展。

参考文献[47]研究了认知 SWIPT MIMO 通信网络中稳健性接收机设计, 在次网络信息解码所需最小均方误差和主用户干扰的约束下最大化能量总和。与传统的 SWIPT 常见的两种接收机 (TS/PS) 模式不同的是, 最近有研究认知 SWIPT MIMO 天线选择策略, 天线选择策略即选择一部分天线用于信息解码, 一部分天线用于收集能量, 并提出两种选择方案, 即优先数据选择 (prioritizing data selection, PDS) 方案与优先选择能量选择 (prioritizing energy selection, PES) 方案。对于 PDS 方案, 需要选择 K 根天线作为 ID 天线, 同时使得在 ID 电路中, SR 接收功率高于特定阈值。对于 PES 方案, 需要选择 K 根天线作为 EH 天线, 同时使得在 EH 电路中, SR 接收功率高于特定阈值。参考文献[48]推导了 PDS 方案中所选 ID 天线的概率质量函数 (probability mass function, PMF)、平均收集能量和中断概率的解析表达式^[48]。其中对于认知 SWIPT 接收机, 在给定天线数 K 的条件下, SR 处的组合信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 为式 (5):

$$\gamma_{\text{ID}}(K) = \frac{P_s \sum_{j=1}^K |h_{sj}|^2}{P_m \sum_{j=1}^K |h_{pj}|^2} = \frac{\Gamma_s(K)}{\Gamma_p(K)} \quad (5)$$

其中, P_s 是 ST 的传输功率, P_m 是 PT 的传输功率。 $\Gamma_s(K) = P_s \sum_{j=1}^K |h_{sj}|^2$ 和 $\Gamma_p(K) = P_m \sum_{j=1}^K |h_{pj}|^2$ 分别为 SR 接收到的来自 ST 和 PT 的用于信息解码 (ID) 的天线接收功率。

SR 收集的能量如下所示:

$$Q(K) = \begin{cases} \zeta (\bar{\Gamma}_s(K) + \bar{\Gamma}_p(K)), & 0 \leq K < N_s \\ 0, & K = N_s \end{cases} \quad (6)$$

其中, ζ 为转换效率, $\bar{\Gamma}_s(K) = P_s \sum_{j=K+1}^{N_s} |h_{sj}|^2$ 和 $\bar{\Gamma}_p(K) = P_m \sum_{j=K+1}^{N_s} |h_{pj}|^2$ 分别为 SR 接收到的来自 ST 和 PT 的用于能量收集 (EH) 的天线接收功率。

参考文献[49]研究了认知 SWIPT 网络中的多目标资源分配, 具体来说, 算法设计包含 3 个重要的系统设计目标: 总发射功率最小化、能量收集效率最大化和干扰功率泄漏对发射功率比最小化。所提算法框架考虑了认知网络安全通信的服务质量要求和潜在窃听用户的不完善信道状态信息, 给出了两种次优的资源分配方案, 而且证明了各设计目标之间存在着折中。在接收器上给出完美的 CSI, ST 和 SR 之间的可达频带利用率由式 (7) 给出:

$$C = \text{lb}(1 + \gamma) \quad (7)$$

其中:

$$\gamma = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{H} \mathbf{w}}{\text{Tr}(\mathbf{H} \mathbf{V}) + \sigma_z^2} \quad (8)$$

其中, γ 为 SR 接收的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR)。 $\mathbf{H}$ 为信道矩阵, $\mathbf{w}$ 为波束成形向量, σ_z^2 为加性高斯白噪声的功率, $\mathbf{V}$ 为协方差矩阵。

参考文献[50]研究了认知 SWIPT MISO 网络下行链路系统模型, 如图 5 所示。在该网络中 SU 与多个 PU 和多个 EH 节点共存。为了保证安全通信和能量收集, 研究了不完全 CSI 下人工噪声辅助的安全稳健波束成形向量设计与功率分配策略。

参考文献[51]研究了基于统计信道不确定性假设, 在中断约束下最大化认知 SWIPT MIMO 网络安全速率问题, 其目标是在满足给定中断概率要求的同时, 通过最大化认知用户的安全速率来设计发射协方差矩阵和人工噪声辅助协方差矩阵。此外, 还扩展了所提算法来解决不确定度模型设计问题。参考文献[52]研究了在认知 SWIPT MISO 网络中配备多天线的 ST 将数据传送给单天线的 SR, SR 采用 PS 接收机进行信息解码与能量收集, 同时研究了 SR 中最差能量收集用户与主用户干扰之间的平衡问题。

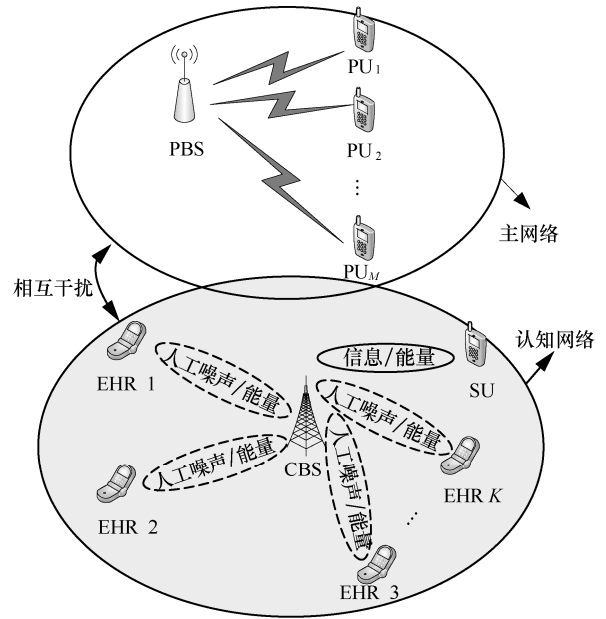


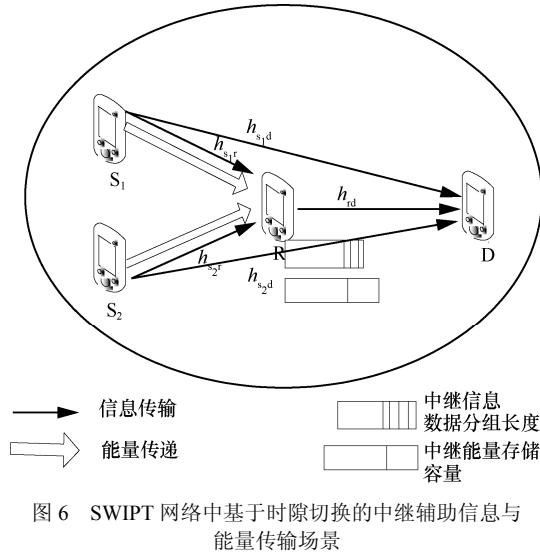
图 5 认知 SWIPT MISO 网络下行链路系统模型

4 SWIPT 网络关键技术与方案

近年来, 针对上述认知 SWIPT 网络中亟待解决的问题, 对认知 SWIPT 网络关键技术进行了研究, 部分研究成果如下。

4.1 SWIPT 网络中能量效率优先中继选择、能量分配与中继辅助信能同传技术

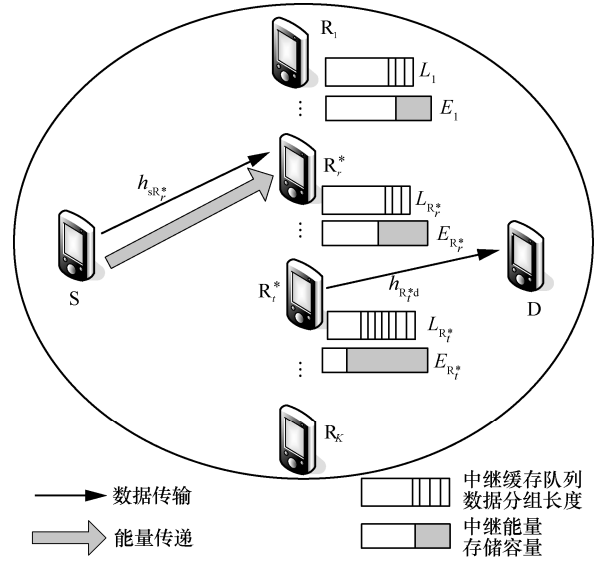
传统中继协议的各中继单独工作, 其性能受到中继的选择、信道状况、距离等诸多因素的影响。作者所在团队研究了中继的协作方案和保障能量效率的缓存队列中继选择与能量分配方案^[53-55]。参考文献[53]提出了基于时隙切换的中继辅助信能同传协议, 给出了采用 TS 的 SWIPT 中继接收机结构, 之后分析了时隙切换因子对中断概率与能量效率的影响, 研究表明, 中断概率随着时隙切换因子的增大而逐渐下降, 能量效率随着时隙切换因子的增大而上升^[53]。但是 SWIPT 节点在不同的发射功率下, 中断概率和能量效率的性能表现有所不同, 对于 SWIPT 节点如何获得“最优”发射功率仍有待进一步的研究。所提方案的场景如图 6 所示, 其中 S_1 、 S_2 为由电源供电的源节点, R 为能量受限的中继节点且其缓存空间足够大, D 为目的节点^[53]。



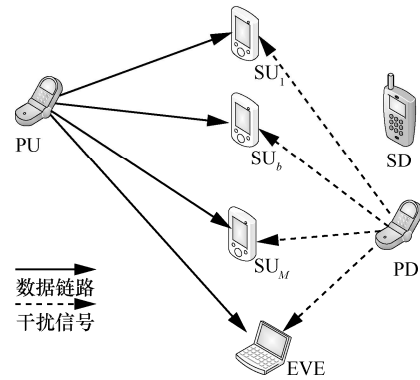
作者研究了缓存队列半双工 SWIPT 中继选择与能量分配方案^[54-55]。缓存队列机制使得信息的收发能在一个时隙内完成，实现虚拟的全双工通信。为了解决此网络下的中继选择问题和能量分配问题，参考文献[54]研究了缓存队列半双工 SWIPT 网络中的中继选择方案，具体如图 7 所示。其中，S 为源节点，D 为目的节点， $R_i (1 \leq i \leq K)$ 表示第 i 个 SWIPT 中继节点，根据中继与源和目的节点之间的信道状态信息和中继缓存状态选择一对最优的收发中继^[54]。参考文献[55]基于该方案，研究了 SWIPT 网络子载波能量分配方案。基于所提注水因子辅助搜索算法^[56]，以最大化能量效率为目标，在满足能量、信息传输速率、最佳接收中继干扰等多个约束的条件下，通过求解优化问题选择 SWIPT 最佳转发中继，得到子载波与能量分配最优解。仿真表明，与以最大化端到端可达速率为目标的联合资源分配算法相比，所提方案考虑了 SWIPT 网络中继间干扰，且当源端发送功率较大时，所提方案可以获得较高的能量效率^[55]。

4.2 认知 SWIPT 网络最佳节点选择、波束成形设计、安全性与可靠性的折中方案

针对认知 SWIPT 网络的安全问题，提出了一种最佳认知 SWIPT 节点选择与波束成形联合设计方法，分析了源节点、发送功率等因素对主网络



的安全通信性能以及认知网络可达通信速率的影响。通过设计合适的波束成形向量以达到所期望的目标，即降低最佳认知节点转发的数据被窃听者窃听的风险，使最佳认知节点的发送波束成形向量 w_p 最小，发送波束成形向量如式 (9) 所示，场景如图 8 所示。图 8 中，PU 和 PD 为主发射机和主接收机，SU 和 SD 为认知发射机和认知接收机，EVE 为窃听用户。



$$w_p = \frac{(I_N - Q_p) h_{S_b D_p}}{\|(I_N - Q_p) h_{S_b D_p}\|} \quad (9)$$

其中， $Q_p = h_{S_b E} (h_{S_b E}^H h_{S_b E})^{-1} h_{S_b E}^H$ ， $h_{S_b E}$ 为第 i 个认知

节点到窃听用户 EVE 链路的信道系数, $\mathbf{I}_N$ 为 $N \times N$ 的单位矩阵, $\mathbf{h}_{S_e D_p}$ 表示最佳认知节点到主接收机的信道系数。

针对 Nakagami- m 衰落信道下认知中继网络存在窃听攻击时的系统安全性与可靠性问题, 研究了由源节点、目的节点和多个中继节点组成的认知解码转发中继网络中物理层安全与可靠性折中方案^[57]。当存在窃听攻击时, 所提方案以最大化安全主链路信道容量为优化目标, 通过最佳中继选择实现安全性与可靠性的折中 (SRT)。与传统直接传输相比, 所提方案的安全性更优, 并且其性能随着中继数量和在一定中继数情况下的 Nakagami 信道衰落因子 m 的增加而显著改善。

5 结束语

随着 5G 技术的发展, “绿色通信”已经成为未来信息与通信技术发展方向之一。建设高能量效率的“绿色无线通信系统”是目前无线通信研究领域的前沿课题之一, 也是未来绿色无线通信网络节能减排与环境保护的关键。理论上, 非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术拥有比正交多址接入技术更高的信息速率, 能进一步地提升频谱利用率 (频谱效率), 因此将 NOMA 技术结合到认知 SWIPT 中也是未来提升频谱效率的研究方向之一^[58-61]。然而, 由于 NOMA 的广播性质^[62-63], 采用 NOMA 的认知 SWIPT 容易被恶意用户窃听。因此, 如何提高 NOMA 的认知 SWIPT 安全性亟待解决。为了提高 SU 的安全速率, 目前已经应用多天线、协作中继、人工噪声 (artificial noise, AN) 辅助干扰等技术^[64-67], 但是使用这些技术所获得的性能增益受到 CSI 准确度的显著影响。因此, 如何准确获得认知 SWIPT 网络中的 CSI 将是一项挑战^[68-69]。

目前, 认知 SWIPT 网络场景中的信道模型均为瑞利衰落信道^[70], 对 Nakagami- m 衰落信道下

的认知 SWIPT 波束成形向量设计与资源调度的研究较为缺乏。因此, 研究 Nakagami- m 衰落信道下认知 SWIPT 网络中的波束成形向量设计与资源调度关键技术也是认知 SWIPT 的未来研究方向之一^[71]。近年来, 随着 MIMO 技术的相对成熟, 对于 SWIPT, 除了传统的 TS 和 PS 方案外, 天线切换 (antenna switching, AS) 技术也成了研究热点之一, 即选择天线子集进行解码信息, 其余用于收集能量^[61]。认知 SWIPT 网络中节点的高速移动性也是认知 SWIPT 波束成形向量设计与资源调度策略需要考虑的因素之一, 需要进一步研究认知用户高速移动场景下的认知 SWIPT 系统模型^[72]。此外, 参考文献[73]表明使用适当的网络编码技术可以增加 SWIPT 网络的能量效率, 因此, 基于网络编码技术进一步改进认知 SWIPT 网络的能量效率具有很大的研究空间^[73]。同时认知 SWIPT 全双工中继模型研究仍有许多问题亟待解决^[74]。

综上所述, 对于只存在一对单天线主用户和单天线认知用户的简单通信网络, 同时认知用户不充当中继也不协作传输信息的情况下, 认知用户只需在主用户空闲时传输认知信息, 其余时间进行能量收集即可, 这种网络存在的主要问题是主用户干扰、潜在窃听用户干扰和安全性问题, 由于通信网络结构较为简单, 已有大量研究这方面的参考文献。对于多天线多用户的复杂认知 SWIPT 网络, 在能量收集认知源节点充当中继的情况下, 目前存在以下问题亟待解决。

- 对于所有节点, 如何选择最优认知中继节点进行传输以进一步提升网络性能。
- 对于认知中继节点, 如何选择最优的天线数来收集能量, 剩余的天线进行信息解码可进一步提升网络性能。
- 对于半双工认知中继节点, 如何优化功率分割因子、子载波分配、功率分配等因素以提升网络容量。
- 对于全双工认知中继节点, 由于信息的收



发能在同一个时隙内完成,因此传统时隙切换策略以及传统的认知SWIPT中继网络的中继选择方案不再适用于全双工认知SWIPT中继网络,如何在此网络以及其他约束条件下进行中继选择需要进一步的研究。

- 对于有缓存队列的认知中继来说,理论上能实现虚拟全双工通信,因此在此种情况下如何进行功率分配、子载波分配等问题也需要进一步的研究。
- 由于认知网络的特性,网络中的信息极易被潜在窃听用户窃听,此时可以用波束成形向量提高网络的安全性。因此在保证网络安全性的条件下,认知SWIPT网络最佳节点选择以及波束成形向量的设计仍需进一步的研究。
- 随着机器学习、神经网络的发展,将这些人工智能技术应用到认知SWIPT网络也成为一个新的研究方向。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [2] JEON J, EPHREMIDES A. The stability region of random multiple access under stochastic energy harvesting[C]// *Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1796-1800.
- [3] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1732-1743.
- [4] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy cooperation in energy harvesting communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(12): 4884-4898.
- [5] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously [C]// *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1612-1616.
- [6] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [7] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(1): 288-300.
- [8] MORSI R, MICHALOPOULOS D, SCHÖBER R. Multi-user scheduling schemes for simultaneous wireless information and power transfer over fading channels [C]// *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4994-4999.
- [9] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [10] XING C, WANG N, NI J, et al. MIMO beamforming designs with partial CSI under energy harvesting constraints [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(4): 363-366.
- [11] CHALISE B K, MA W K, ZHANG Y D, et al. Optimum performance boundaries of OSTBC based AF-MIMO relay system with energy harvesting receiver [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(17): 4199-4213.
- [12] XIANG Z, TAO M. Robust beamforming for wireless information and power transmission [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 4(1): 372-375.
- [13] WU S X, LI Q, MA W K, et al. Robust transmit designs for an energy harvesting multicast system [C]// *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4748-4752.
- [14] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Robust beamforming for secure communication in systems with wireless information and power transfer [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(8): 4599-4615.
- [15] LI Q, MA W K. Robust artificial noise-aided transmit optimization for achieving secrecy and energy harvesting[C]// *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1596-1600.
- [16] KRIKIDIS I, SASAKI S, TIMOTHEOU S, et al. A low complexity antenna switching for joint wireless information and energy transfer in MIMO relay channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(5): 1577-1587.
- [17] ZHOU X, LI Q. Energy efficiency optimization for SWIPT AF two-way relay networks [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(6): 436-438.
- [18] SHENG M, WANG L, WANG X, et al. Energy-efficient beam-forming in MISO heterogeneous cellular networks with wireless information and power transfer [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 954-968.
- [19] GUO S, WANG F, YANG Y, et al. Energy-efficient cooperative transmission for simultaneous wireless information and power transfer in clustered wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans-*

- actions on Communications, 2015, 63(11): 4405-4417.
- [20] 卢晓梅. 认知无线电系统的携能关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- LU X M. Research on key SWIPT technology in cognitive radio systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [21] PARK S, HEO J, KIM B, et al. Optimal mode selection for cognitive radio sensor networks with RF energy harvesting [C]// Proceedings of 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2155-2159.
- [22] LEE S, ZHANG R, HUANG K. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4788-4799.
- [23] SIBOMANA L, ZEPERNICK H, TRAN H. Wireless information and power transfer in an underlay cognitive radio network [C]// Proceedings of 2014 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-7.
- [24] JIHYUN S, DONGWOO K. Simultaneous wireless information and power transfer for cognitive radio systems with average energy harvesting constraint [C]// Proceedings of 2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 156-157.
- [25] ZHENG G, HO Z, JORSWIECK E A, et al. Information and energy cooperation in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(9): 2290-2303.
- [26] PARK S, HONG D. Achievable throughput of energy harvesting cognitive radio network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1010-1022.
- [27] MOUSAVIFAR S A, LIU L, LEUNG C, et al. Wireless energy harvesting and spectrum sharing in cognitive radio [C]// Proceedings of 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [28] LE T, SHIN O. Wireless energy harvesting in cognitive radio with opportunistic relays selection [C]// Proceedings of 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 949-953.
- [29] YIN S, ZHANG E, QU Z, et al. Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(9): 4693-4707.
- [30] WANG Z, CHEN Z, XIA B, et al. Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: design, analysis, and optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2562-2576.
- [31] YANG Z, DING Z, FAN P, et al. Outage performance of cognitive relay networks with wireless information and power transfer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3828-3833.
- [32] YAN J, LIU Y. A dynamic SWIPT approach for cooperative cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11122-11136.
- [33] SHAFIE A EL, AL-DHAHIR N, HAMILA R. Cooperative access schemes for efficient SWIPT transmissions in cognitive radio networks [C]// Proceedings of 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [34] MUKHERJEE A, ACHARYA T, KHANDAKER M R A. Outage analysis for SWIPT-enabled two-way cognitive cooperative communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 9032-9036.
- [35] AL-HABOB A A, SALHAB A M, ZUMMO S A et al. Multi-destination cognitive radio relay network with SWIPT and multiple primary receivers [C]// Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [36] NGUYEN V D, DINH-VAN S, SHIN O S. Opportunistic relaying with wireless energy harvesting in a cognitive radio system[C]// Proceedings of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 87-92.
- [37] AL-HABOB A A, SALHAB A M, ZUMMO S A. An efficient time switching relaying protocol for multiuser cognitive radio relay networks with SWIPT [J]. Computer Physics Communications, 2018, 30(1): 86-96.
- [38] LU X, XU W, LI S, et al. Simultaneous information and power transfer for relay-assisted cognitive radio networks [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 331-336.
- [39] LU X, XU W, LI S, et al. Simultaneous wireless information and power transfer for cognitive two-way relaying networks[C]// Proceedings of 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Piscataway: IEEE Press, 2014: 748-752.
- [40] 王翔. 认知中继系统中携能关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- WANG X. Research on key SWIPT technologies in cognitive relay systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [41] WU Y, CHEN X. Robust beamforming and power splitting for secrecy wireless information and power transfer in cognitive relay networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1152-1155.
- [42] XU D, LI Q. Optimization of multiuser multichannel cognitive radio networks with wireless information and power transfer [C]// Proceedings of 2016 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.



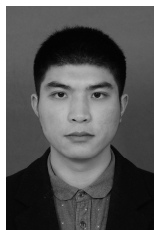
- [43] ZHANG R, LIANG Y C. Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 88-102.
- [44] PHAN K T, VOROBYOV S A, SIDIROPOULOS N D, et al. Spectrum sharing in wireless networks via QoS-aware secondary multicast beamforming [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(6): 2323-2335.
- [45] ZHANG R, LIANG Y C, CUI S. Dynamic resource allocation in cognitive radio networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 102-114.
- [46] MOHJAZI L, AHMED I, MUHAIDAT S, et al. Downlink beamforming for SWIPT multi-user MISO underlay cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Letter*, 2017, 21(2): 434-437.
- [47] XU C, ZHANG Q, LI Q, et al. Robust transceiver design for wireless information and power transmission in underlay MIMO cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(9): 1665-1668.
- [48] BENKHELIFA F, ALOUINI M. A thresholding-based antenna switching in MIMO cognitive radio networks with SWIPT-enabled secondary receiver [C]// *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [49] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Multi-objective resource allocation for secure communication in cognitive radio networks with wireless information and power transfer [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3166-3184.
- [50] ZHOU F, LI Z, CHENG J, LI Q. Robust an-aided beamforming and power splitting design for secure MISO cognitive radio with SWIPT [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(4): 2450-2464.
- [51] YUAN Y, DING Z. Outage constrained secrecy rate maximization design with SWIPT in MIMO-CR systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(6): 5475-5480.
- [52] TUAN P V, KOO I. Optimal multiuser MISO beamforming for power-splitting SWIPT cognitive radio networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(1): 14141-14153.
- [53] 洪鑫龙, 许晓荣, 石振波. 无线携能网络中一种基于时隙切换的中继辅助信能同传协议[J]. *信号处理*, 2018, 34(12): 1467-1473.
- HONG X L, XU X R, SHI Z B. A relay-aided information and power transfer protocol based on time switching structure in SWIPT [J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(12): 1467-1473.
- [54] 洪鑫龙, 许晓荣, 姚英彪. 无线携能通信中一种能量效率优先的缓存队列机制中继选择方案[J]. *电信科学*, 2018, 34(3): 67-75.
- HONG X L, XU X R, YAO Y B. Energy-efficiency based buffer-aided relay selection scheme in SWIPT [J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(3): 67-75.
- [55] 石振波, 许晓荣, 孙明杭, 等. 携能网络中保障能量效率的缓存队列中继选择与能量分配方案[J]. *信号处理*, 2019, 35(11): 1880-1887.
- SHI Z B, XU X R, SUN M H, et al. Energy-efficiency priority based buffer-aided relay selection and power allocation strategy in SWIPT network [J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(11): 1880-1887.
- [56] 伍伟伟, 许晓荣, 王云川, 等. 采用注水因子辅助搜索的能量效率优先子载波功率联合优化算法[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(8): 59-64, 71.
- WU W W, XU X R, WANG Y C, et al. Joint optimization algorithm for subcarrier and power with priority of energy efficiency based on water-filling factor aided search[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(8): 59-64, 71.
- [57] 王兴鹏, 许晓荣, 胡安迪, 等. Nakagami- m 衰落信道下存在窃听攻击的认知中继网络安全性与可靠性折中方案[J]. *电信科学*, 2018, 34(12): 24-32.
- WANG X P, XU X R, HU A D, et al. Security-reliability tradeoff scheme for cognitive relay networks with eavesdropping attack over Nakagami- m fading channels [J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(12): 24-32.
- [58] ZHOU F, CHU Z, SUN H, et al. Artificial noise aided secure cognitive beamforming for cooperative MISO-NOMA using SWIPT [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(4): 918-931.
- [59] SU R, WANG Y, SUN R. Destination-assisted jamming for physical-layer security in SWIPT cognitive radio systems [C]// *Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [60] SONG Z, WANG X, LIU Y, et al. Joint spectrum resource allocation in NOMA-based cognitive radio network with SWIPT [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 89594-89603.
- [61] SUN H, ZHOU F, HU R Q, et al. Robust beamforming design in a NOMA cognitive radio network relying on SWIPT [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 142-155.
- [62] WU Y, SCHÖBER R, NG D W K, et al. Secure massive MIMO transmission with an active eavesdropper [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(7): 3880-3990.
- [63] ZHANG Y, WANG H K, YANG Q, et al. Secrecy sum rate maximization in non-orthogonal multiple access [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5): 930-933.
- [64] WU Y, SCHÖBER R, NG D W K, et al. Secure massive MIMO transmission in the presence of an active eavesdropper [C]// *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1434-1440.
- [65] PEI Y, LIANG Y C, ZHANG L, et al. Secure communication

- over MISO cognitive radio channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1494-1502.
- [66] ZOU Y, LI X, LIANG Y C. Secrecy outage and diversity analysis of cognitive radio systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(11): 2222-2236.
- [67] ZOU Y, ZHU J, LI X, et al. Relay selection for wireless communications against eavesdropping: a security-reliability trade-off perspective [J]. IEEE Network, 2016, 30(5): 74-79.
- [68] ZHANG Q, LI Q, QIN J. Robust beamforming for non-orthogonal multiple-access systems in MISO channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10231-10236.
- [69] ALAVI F, CUMANAN K, DING Z, et al. Robust beamforming techniques for non-orthogonal multiple access systems with bounded channel uncertainties [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(9): 2033-2036.
- [70] WANG Z, CHEN Z, XIA B, et al. Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: design, analysis and optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2562-2576.
- [71] CHENG Y, YANG J, DING J, et al. Outage performance analysis of underlay cognitive DF relaying network with SWIPT in Nakagami- m fading environment [C]// Proceedings of 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [72] COARASA A H, NINTANAVONGSA P, SANYAL S, et al. Impact of mobile transmitter sources on radio frequency wireless energy harvesting [C]// Proceedings of 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 573-577.
- [73] CAO H, LIQUN F, HONGNING D. Throughput analysis of the two-way relay system with network coding and energy harvesting [C]// Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [74] HOSSAIN M A, MD N R, YAU K A, et al. A survey on simultaneous wireless information and power transfer with cooperative relay and future challenges [J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 19166-19198.

[作者简介]



许晓荣 (1982—)，男，博士后，杭州电子科技大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为认知无线电与认知无线携能通信中的中继选择、资源调度与优化、物理层安全技术等。



孙明杭 (1995—)，男，杭州电子科技大学硕士生，主要研究方向为认知无线携能通信中保障能量效率的资源调度策略优化技术等。



沈霖晖 (1995—)，男，杭州电子科技大学硕士生，主要研究方向为绿色携能网络中信息传输与能量收集均衡策略设计与优化等。



姚英彪 (1976—)，男，博士后，杭州电子科技大学教授、硕士生导师，主要研究方向为无线网络的能量有效性与无线资源管理等。



冯维 (1984—)，女，博士，杭州电子科技大学讲师，主要研究方向为无线多跳网络中的物理层安全策略等。